

INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA ABSORVIDA NO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY EM MATERIAIS METÁLICOS*

Eduardo Christo Saltoratto¹
William Naville²

Resumo

Foram realizados tratamentos térmicos de têmpera e revenimento para aumentar a tenacidade do material, aço NM87 designação 1045, uma vez que ele apresentava, no estado inicial, baixa absorção de energia. Com o material mais tenaz foi obtida uma melhor faixa de energia para cálculo das incertezas. Foram feitos corpos de prova com variações nas medidas laterais, de comprimento e profundidade do entalhe e ensaiados na temperatura ambiente para determinação das incertezas do tipo A e B. Com as incertezas determinadas pelos métodos estatísticos e não estatísticos, foram feitos ensaios, variando-se a temperatura, para obter dados de ductilidade (energia absorvida, expansão lateral e percentual de área dúctil) em relação a temperatura e com esses dados determinar-se a temperatura de transição dúctil – frágil e sua incerteza.

Palavras-chave: Aço 1045; Tenacidade; Incerteza; Temperatura de transição.

MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE DETERMINATION OF ABSORBED ENERGY IN CHARPY IMPACT TEST IN METALLIC MATERIALS

Abstract

Quenching and tempering heat treatment were performed to increase the toughness of the material, NM87 1045 steel designation, once it had in the initial state, low energy absorption. With the most tenacious material, better power range for calculation of uncertainties was obtain. Specimens with variations on measures, length, and depth of the notch and tested at room temperature. We are determined the type of uncertainty A and B. With some uncertainty by the statistical and non-statistical methods, tests were done at varying temperatures, ductility data for (absorbed energy ductile and lateral expansion area percentage) of temperature and to determine that data to ductile -fragile transition temperature and its uncertainty.

Keywords: 1045 steel; Tenacity; Uncertainty; Transition temperature.

¹ Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.

² Engenharia Industrial Mecânica, Mestre em Ciências, Professor, Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Quando submetidos a esforços, os materiais geralmente exibem diferentes propriedades e os resultados variam de deformações a fraturas. A maioria dos materiais resistem a uma grande carga antes de uma ruptura, isso se a carga for aplicada vagarosamente ao longo de um grande intervalo de tempo, porém, se uma pequena carga for aplicada subitamente, o material pode romper-se, aparentando ter uma fragilidade maior do que a fragilidade que ele realmente tem. Por esse motivo, o fato de muitos materiais serem tão dependentes da taxa de deformação, testes foram padronizados para determinar a energia necessária para quebrar materiais sob impactos repentinos. Esses testes são classificados como testes de impacto. O resultado geral de um teste de impacto é a medição da energia requerida para quebrar um corpo de prova [1].

Toda medição de uma grandeza física deve indicar quantitativamente a qualidade do resultado, incerteza de medição, possibilitando a avaliação da confiabilidade e viabilizando a comparação com outros resultados ou com especificações. A incerteza consiste de vários componentes, que são todos os erros não conhecidos que possam ser estimados envolvidos na medição, os do tipo A são a avaliação da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição, enquanto as incertezas do tipo B são todas as incertezas avaliadas por meios que não sejam estatísticos, como a incerteza na resolução da escala de um equipamento, na calibração do equipamento a ser utilizado ou em algum valor importado de outro experimento [2,3].

O objetivo desse trabalho é determinar a incerteza da medição da energia absorvida de corpos de prova de impacto Charpy com entalhe em V, bem como, a temperatura de transição de dúctil para frágil, onde se mede a energia absorvida desses corpos de prova em diferentes temperaturas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Devido à baixa tenacidade apresentada inicialmente, foram escolhidos os tratamentos de têmpera e revenimento para deixar o material mais tenaz. Foram preparados 120 corpos de prova por meio de corte e entalhe conforme a norma ASTM E23 [4]. Os corpos de prova foram cortados e entalhados e marcados. Alguns desvios de dimensões foram propositalmente realizados para identificar suas influências na incerteza de medição.

Nos corpos de prova utilizados para determinação da temperatura de transição dúctil frágil (TTDF) os corpos de prova foram fabricados de acordo com a especificação. Para caracterização do material foram realizadas preparações metalográficas conforme a norma ASTM E3 [5]. O ataque ácido na superfície foi feito utilizando-se o reagente nítrico a 2%.

A têmpera foi feita à 865°C em um forno com atmosfera interna composta somente de gás nitrogênio, por cerca de 60 minutos e o resfriamento foi feito em água.

O revenimento foi feito a 600°C, sem nenhum tratamento especial na atmosfera do forno, por 120 minutos e posterior resfriamento ao ar.

Os ensaios de impacto, medição da energia absorvida, medição da expansão lateral e do percentual de fratura dúctil foram realizados de acordo com a norma ASTM E23 [4] para a temperatura ambiente. Para os ensaios com variação da temperatura foi utilizado o banho térmico de álcool e gelo seco, com a temperatura ambiente sendo a inicial e resfriando-se gradativamente. Durante o resfriamento foram necessárias

pausas para estabilização da temperatura conforme a norma ASTM E23 [4] e, também seguindo a norma, foram realizados os ensaios com menos de 5 segundos entre a retirada do corpo de prova do meio com álcool e o impacto do pêndulo.

O equipamento utilizado foi um PSW 30 Losenhausenwerk, regularmente calibrado por laboratório acreditado (CAL 0003) certificados 135 684 -101 e 135 683-101.

Foram determinadas e calculadas as fontes de incerteza, as incertezas combinadas e as incertezas expandidas para a energia absorvida, medição da expansão lateral e determinação do percentual de fratura dúctil com base no Guia para Expressão de Incerteza de Medição, JCGM, 2008 [2]. As incertezas do tipo A foram determinadas por meio das equações de 1 a 3.

Média dos resultados obtidos:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (1)$$

Variância da distribuição de probabilidade:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (2)$$

Variância da média:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (3)$$

Obteve-se a contribuição da incerteza do tipo A por meio da raiz quadrada da variância da média.

As incertezas do tipo B foram consideradas em função de cada característica medida. Para determinação da energia absorvida foram consideradas as incertezas do erro no zero do equipamento provocado pelo atrito (distribuição retangular), da calibração do equipamento (distribuição normal), da resolução da escala do equipamento (distribuição retangular), da medição das dimensões dos corpos de prova (distribuição retangular), das tendências das variações em função da profundidade do entalhe, área e comprimento dos corpos de prova em ambos os casos, desvios propositais e desvios permitidos pela norma.

Considerou-se que as variações de propriedades intrínsecas ao material e o posicionamento dos corpos de prova entre os apoios estão incorporadas no resultado da incerteza do tipo A.

A incerteza combinada foi obtida pela raiz quadrada da soma de todas as variâncias do tipo A e do tipo B.

A incerteza expandida foi obtida multiplicando-se a incerteza combinada pelo fator de abrangência $k=2$, para um intervalo de confiança de 95,45 %.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MATERIAL

Por meio da análise metalográfica, na condição de recebimento, foi possível observar ao microscópio as inclusões do material e que não apareceram diferenças entre os lados para posicionamento do entalhe. Conclui-se que as inclusões são do tipo D,

óxido globular, variando entre 1/2 a 2 e 1/2 e são da série fina. A microestrutura inicial era composta de ferrita e perlita (figura 1) com tamanho de grão predominante variando entre ASTM 6 e 6,5. Após o tratamento térmico a microestrutura obtida foi martensita e ferrita (figura 2). Dureza do material conforme recebido: 34 ± 1 HRC, após tratamento térmico: 97 – 100 HRB.



Figura 1. Aspecto da microestrutura composta por ferrita e perlita.



Figura 2. Aspecto da microestrutura composta por martensita revenida e ferrita.

3.2 ENERGIA ABSORVIDA E INCERTEZAS

De acordo com a norma ASTM E23 [4], as dimensões máximas e mínimas permitidas para o corpo de prova são comprimento= 55.0 ± 0.1 mm, largura= 10.00 ± 0.13 mm e espessura= 10.00 ± 0.13 mm, mostradas na figura 3. Para a profundidade do entalhe, a variação é de $2 \pm 0,025$ mm.

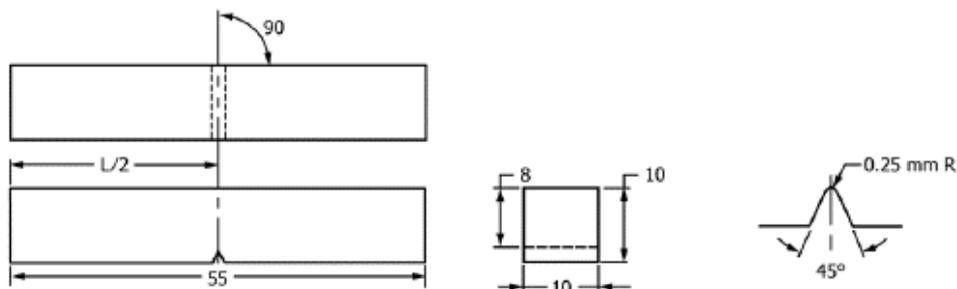


Figura 3. Medidas do corpo de prova.
Fonte: Norma ASTM E23 [4].

Na fabricação dos corpos de prova, essas dimensões foram negligenciadas propositalmente, isso foi feito com o intuito de se obter uma nuvem de pontos que relacionam determinada variação de dimensão com as energias medidas, plotando-se esses pontos, observou-se uma tendência linear de aumento ou decréscimo, com essas equações, para cada dimensão, obteve-se a faixa de variação em função da tolerância, conforme a tabela 1.

Tabela 1. Variações devida as variações das dimensões dos corpos de prova.

	Energia para a menor medida (J)	Energia para a maior medida (J)	Variação (J)
Profundidade do entalhe	97,3	98,4	1,1
Área (micrômetro)	93,9	107,4	13,6
Área (projeto de perfil)	95,1	108,6	13,5
Comprimento	99,8	99,5	0,3

Por meio das equações 1, 2 e 3, foi possível obter para cada parâmetro, a média, a variância da distribuição, a variância da média e a incerteza, mostradas na tabela 2. O cálculo da incerteza do tipo A também pode ser feito para a medida da expansão lateral e o percentual de ductilidade na comparação com a foto da norma ASTM E23 [4].

Tabela 2. Incertezas do tipo A.

	Média	Variância de distribuição de probabilidade	Variância da média	Incerteza
Energia absorvida	99,2 J	41,6 J ²	1,4 J ²	1,2 J
Expansão lateral	1,396 mm	0,017 mm ²	0,0006 mm ²	0,024 mm
Percentual de ductilidade	57,7 %	32,3 % ²	1,1 % ²	1,0 %

A tabela 3 mostra as incertezas do tipo B oriundas da indicação da energia absorvida pelo equipamento de ensaio e variações dimensionais. Nota-se um divisor que depende do fator de distribuição, quando inferido normal, refere-se a uma curva de distribuição normal, quando inferido retangular refere-se a uma curva de distribuição retangular, esse último é utilizado quando há pouca informação disponível sobre a grandeza de entrada [3].

Tabela 3. Incertezas do tipo B para energia absorvida.

	Incerteza de entrada	Fator de distribuição	Divisor (k)	Contribuição (u')
Energia aplicada	0,50 J	Normal	2	0,25 J
Energia perdida por atrito	1,76 J	Normal	2	0,88 J
Escala do equipamento de impacto	0,98 J	Retangular	1,73	0,57 J
Determinação da profundidade do entalhe	0,50 J	Retangular	1,73	0,29 J
Profundidade do entalhe	1,10 J	Retangular	1,73	0,65 J
Varição de área	13,60 J	Retangular	1,73	7,80 J
Varição de comprimento	0,30 J	Retangular	1,73	0,15 J

Considerando-se a combinação das incertezas para a determinação da energia absorvida, temos que a incerteza combinada resultou em 8 J. Nessa soma foi utilizada a área calculada com o micrômetro por possuir uma incerteza ligeiramente maior, garantindo assim maior grau de confiabilidade. Portanto, a incerteza expandida foi de 16 J, fator de abrangência $k = 2$ para 95,45 % de confiança.

A expansão lateral também possui uma variação do tipo B referente ao equipamento projetor de perfis. Os erros do projetor de perfis são referentes à calibração e à resolução do equipamento, tabela 4:

Tabela 4. Incertezas do tipo B para expansão lateral.

	Incerteza de entrada	Fator de distribuição	Divisor (k)	Contribuição (u')
Calibração do projetor de perfis	0,002 mm	Normal	2	0,0010 mm
Resolução de leitura do projetor de perfis	0,001 mm	Retangular	1,73	0,0006 mm

Assim, para a expansão lateral, temos que a incerteza combinada é 0,024 mm e o resultado da incerteza expandida é 0,047 mm, fator de abrangência $k = 2$ para 95,45 % de confiança.

Incerteza para a determinação do percentual de ductilidade da fratura: da comparação com a norma, temos que a resolução para comparação com a foto (ASTM E 23 [4]) é $U=10\%$. Considerando-se uma distribuição retangular, temos que o divisor é igual a 1,73, resultando em uma incerteza u' (comparação) = 5,8%. Dessa forma, temos uma incerteza combinada de 5,9 % e uma incerteza expandida de 11,7 %, fator de abrangência $k = 2$ para 95,45 % de confiança.

A tabela 5 resume os valores médios e de incerteza expandida para as grandezas determinadas:

Tabela 5. Grandezas e incertezas encontradas

Grandeza	Valor Médio	Incerteza expandida
Energia absorvida (J)	99	16
Expansão lateral (mm)	1,396	0,047
Porcentagem de fratura dúctil (%)	58	12

A incerteza na determinação da energia absorvida foi de aproximadamente 16 % do valor médio, um valor considerável para uma tomada de decisão em relação a aprovação de um determinado material. No caso da incerteza da expansão lateral, a incerteza foi de aproximadamente 3,4 %, menor que a energia absorvida e promissor para determinação da temperatura de transição dúctil-frágil. Finalmente, 20,3 % foi a incerteza na determinação da porcentagem de fratura dúctil, provavelmente a pior

opção para tomada de decisão e determinação da temperatura de transição dúctil-frágil.

Para determinação da incerteza relativa à medição da temperatura de transição dúctil-frágil temos: Uma resolução de leitura de $0,1^{\circ}\text{C}$, uma incerteza de medida de $0,4^{\circ}\text{C}$ e um desvio de 1°C , resultando em uma incerteza combinada $u'(\text{temperatura}) = 1,0^{\circ}\text{C}$. A incerteza expandida, para $k=2$, é $2,0^{\circ}\text{C}$.

Ao tratar os dados de acordo com a tangente hiperbólica e variando as incertezas da temperatura (IT), de energia (IE), da contração lateral (ICL) e da comparação visual do percentual dúctil (IC), foi possível obter os gráficos, figuras 4, 5 e 6.

Nos gráficos das figuras 4, 5 e 6, nota-se o deslocamento das curvas em função da combinação de incertezas, onde, "+IT+IE" representa a curva da energia absorvida pela temperatura considerando um erro positivo das incertezas para a temperatura e para a energia absorvida e assim respectivamente. A temperatura de transição de dúctil para frágil é apresentada na tabela 6.

Tabela 6. Valores da temperatura de transição dúctil-frágil:

TTDF ($^{\circ}\text{C}$)	Grandeza	Incerteza expandida ($^{\circ}\text{C}$)
-21,0	Energia absorvida	
-20,4	Contração lateral	2,0
-43,7	% de fratura dúctil (visual)	

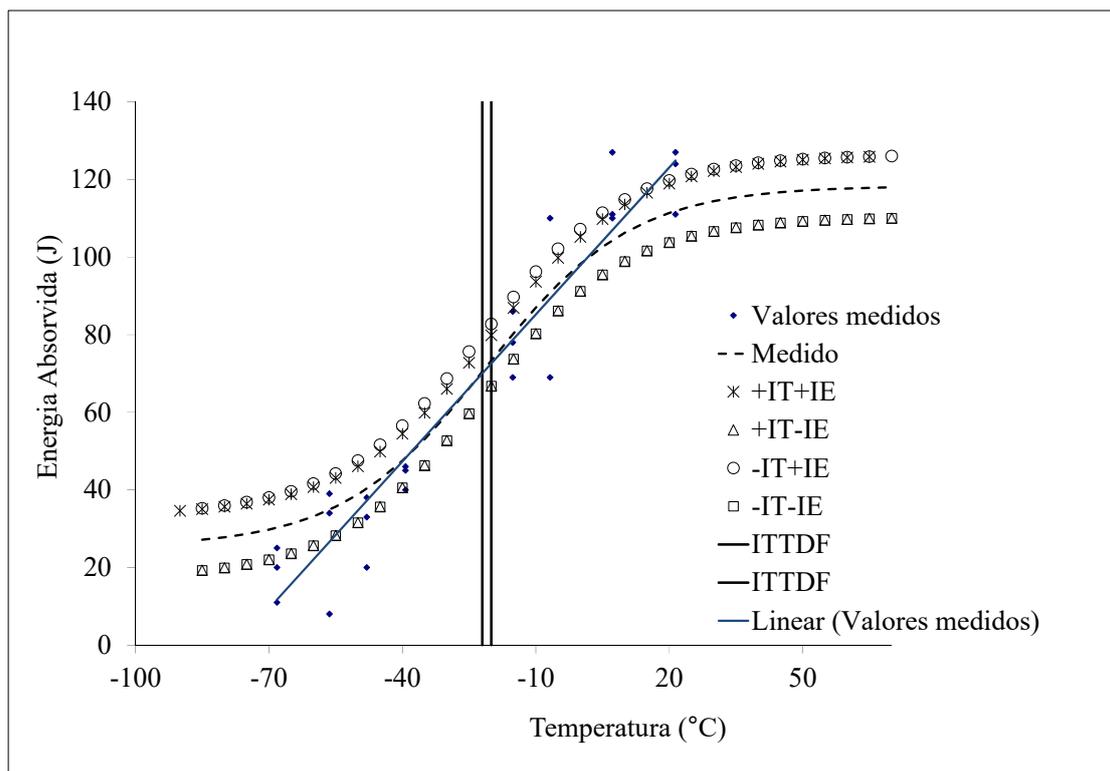


Figura 4. Gráfico da energia absorvida (J) pela temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

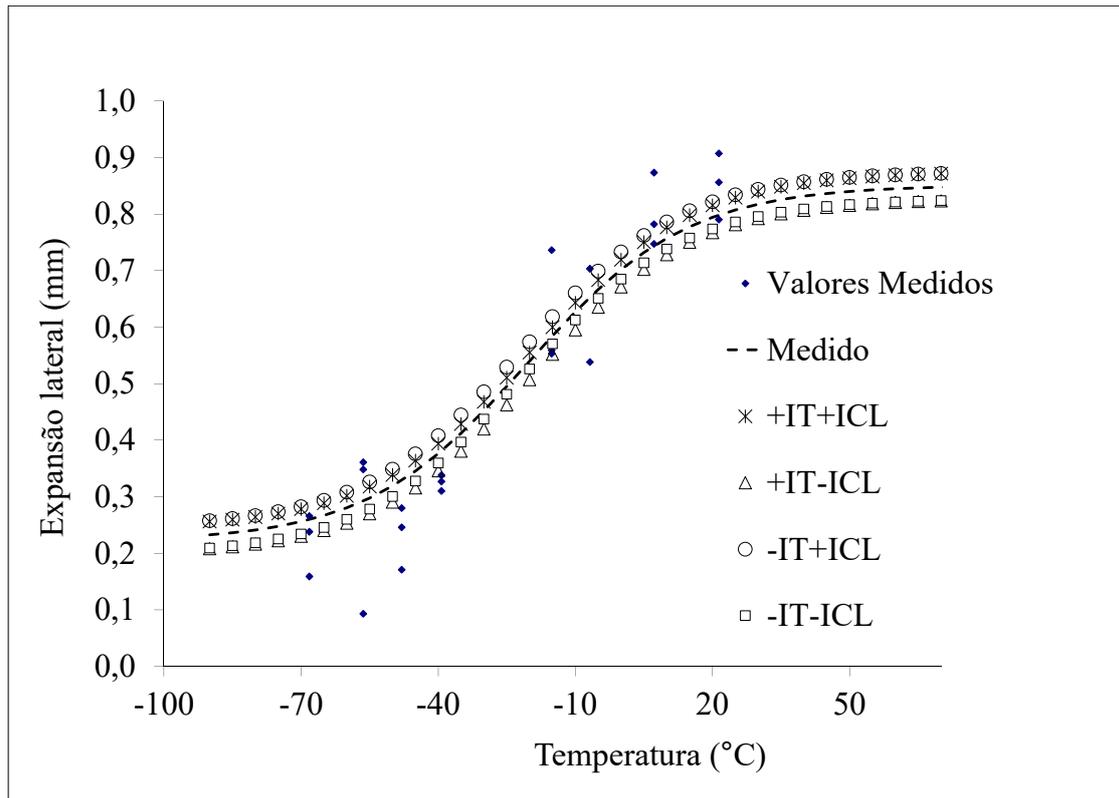


Figura 5. Gráfico da expansão lateral (mm) pela temperatura (°C).

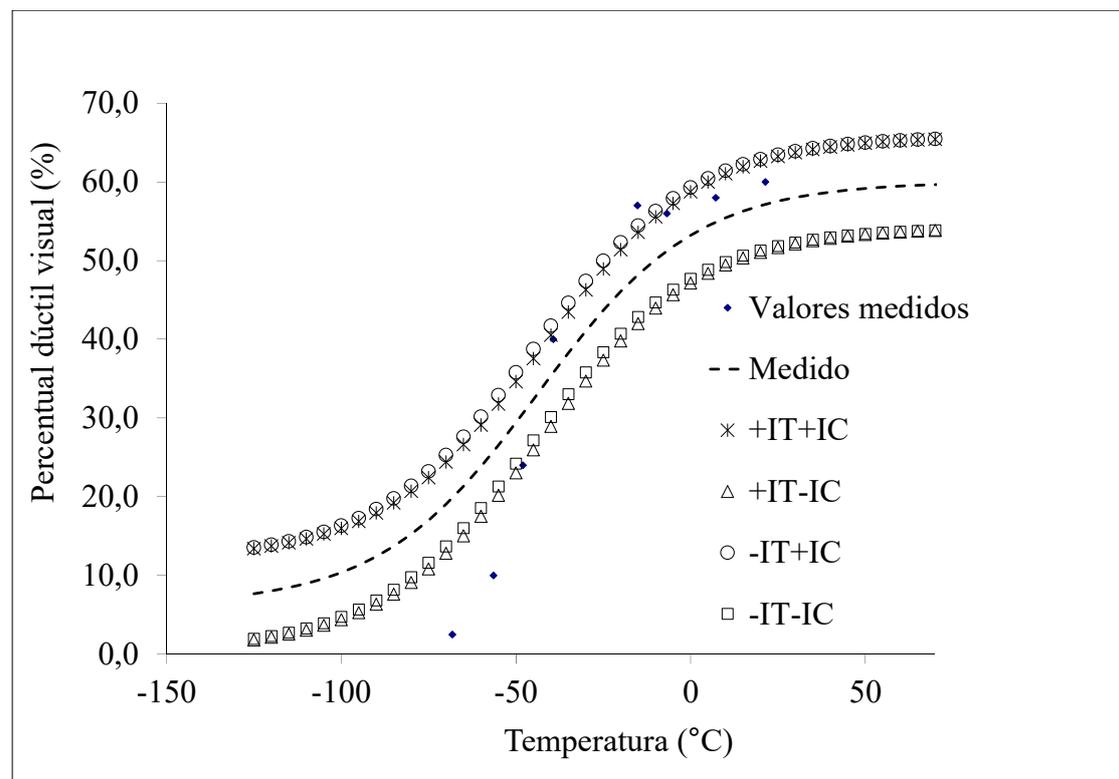


Figura 6. Gráfico do %dúctil visual pela temperatura (°C).

Nota-se, que as incertezas na determinação da energia absorvida, contração lateral e percentual de fratura dúctil não influenciam o cálculo da TTDF, apenas deslocam os patamares superior e inferior para mais ou para menos. Já a incerteza na medição da temperatura altera o resultado da TTDF, sendo que essa alteração desloca o valor

diretamente no eixo da temperatura, figura 4, ou seja, o sistema de medição da temperatura nos ensaios para determinação da TTDF representa a principal fonte de incerteza (ordenada do eixo X), não há influência das ordenadas do eixo Y, sendo a expansão lateral a mais precisa. Como calculado anteriormente, a TTDF determinada a partir da contração lateral é a com menor imprecisão. Assim, temos que a TTDF do material é $-20,4 \pm 2,0$ °C.

Destaca-se que o método utilizado para determinação da TTDF nesse trabalho foi o da Tangente Hiperbólica, a literatura indica outros métodos tais como: temperatura correspondente ao ponto da curva de energia absorvida por temperatura onde se inicia a queda no valor da energia absorvida, também designada por temperatura de transição plástica de fratura; temperatura correspondente ao ponto da curva anteriormente citada onde o valor de energia absorvida é igual à média dos dois patamares; temperatura abaixo da qual o material apresenta energia absorvida inferior a um valor pré-estipulado; temperatura acima da qual a fratura é 100% fibrosa; temperatura que produz uma fratura 50% fibrosa e 50% brilhante e temperatura abaixo da qual a fratura é 100% brilhante (temperatura de ductilidade nula) [6]. Para cada procedimento desse adotado haverá um tratamento para estimativa da incerteza de medição dessa temperatura.

4 CONCLUSÕES

A incerteza na determinação da energia absorvida, em temperatura ambiente foi de aproximadamente 16 % do valor médio, um valor considerável para uma tomada de decisão em relação a aprovação de um determinado material.

A TTDF determinada a partir da contração lateral é a com menor imprecisão, a TTDF para o aço utilizado na condição de temperado e revenido a 600 °C é de $-20,4 \pm 2$ °C. As incertezas oriundas da medição da energia, contração lateral e avaliação do percentual de fratura dúctil, quando simuladas para mais ou para menos não alteram o resultado da TTDF, sendo a incerteza da medição da temperatura o valor da incerteza da determinação da temperatura de transição de dúctil para frágil.

Agradecimentos

Ao Centro Universitário da FEI pela oportunidade de realização desta iniciação científica (PBIC).

REFERÊNCIAS

- 1 HORATH, Larry. Fundamentals of Materials Science for Technologists: properties, testing and laboratory exercises. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1995.
- 2 Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados. JCGM, 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em 4 out 2014.
- 3 Grupo de Trabalho 1 do Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM/WG 1). Avaliação de dados de medição – Guia para expressão de incerteza de medição. JCGM, 2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2014, 15:24:50.

- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 23 – 12c: Standard test methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Material. Philadelphia, ASTM International, 2012.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E 3 – 11: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. Philadelphia, ASTM International, 2011.
- 6 GOUVEIA, Kátia C. Investigação dos métodos de determinação da Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) utilizando ensaio de Impacto Charpy. Dissertação. Centro Universitário da FEI – São Paulo, 2013.